

Auf den Punkt gebracht:

Energieverbrauch und Emissionen von Personenwagen

**Zahlen, Fakten und Prognosen zu Emissionen, alternativen
Treibstoffen und Motoren**

Bern, März 2006

Verfasser: auto-schweiz
Vereinigung Schweizer Automobil-Importeure
Bern

Bearbeitung: R. Blessing, Dipl. Ing. HTL
A. Burgener, Direktor
E. Daetwyler, PR

Emissionen von Personenwagen

1	Vorwort	4
2	Zusammenfassung	5
3	Ausgangslage	6
4	Emissionen	8
4.1	Aktuell gültige Grenzwerte für Personenwagen.....	8
4.2	Welche Grenzwerte bringt die EURO 5-Norm?	8
4.3	Kurzbeschreibung der amerikanischen Abgasvorschriften.....	8
4.4	Auswertung der Emissionen nach Schweizer Typengenehmigungen	9
4.5	Emissionen beim Abbrennen des Russes in einem Partikelfilter.....	12
5	Treibstoffe.....	13
5.1	Mögliche Alternativen und/oder Ergänzungen zu Benzin und Diesel	13
5.2	Kurzdefinitionen der verschiedenen Treibstoffe	13
5.2.1	Benzin	13
5.2.2	Diesel	14
5.2.3	Erdgas (CNG).....	14
5.2.4	Biogas	14
5.2.5	Flüssiggas (Autogas).....	14
5.2.6	Alkohole (Methanol und Ethanol)	14
5.2.7	GTL (Synfuel).....	14
5.2.8	FAME (Fettsäuremethylester)	15
5.2.9	ETBE (Ethyltertiärbutylether).....	15
5.2.10	DME (Dimethylether).....	15
5.3	«Well-to-Wheel» Analyse	16
6	Motorentchnik.....	18
6.1	Benzinmotoren	18
6.2	Dieselmotoren	18
6.3	Erdgasmotoren.....	19
6.4	Hybridantriebe	19
7	Das Wichtigste auf einen Blick	20
7.1	Schadstoffemissionen	20
7.2	Treibhausgase und Energieverbrauch.....	20
7.3	Treibstoffe	20
8	Abkürzungen	21
9	Literaturverzeichnis	22

1 Vorwort

Die weltumspannende Klimaveränderung ist nicht von der Hand zu weisen. Es ist heute völlig unbestritten, dass sich das Klima in der Vergangenheit, insbesondere über "geologische" Zeiträume, auf natürliche Weise markant verändert hat. Gletscher schmelzen, die Unwetter scheinen sich zu häufen und an Heftigkeit zuzunehmen, der schwindende Permafrost destabilisiert ganze Bergflanken und gefährdet dadurch die bewohnte Talsohle. Unser Planet, Wohnstätte aller Menschen, fühlt sich angegriffen und schlägt mit Vehemenz zurück. Die Frage nach den „Schuldigen“ erübrigt sich, denn die Antwort kennen wir längst. Aber gegenseitige Schuldzuweisungen helfen niemandem weiter, Handeln ist gefragt.

Das haben sich auch die Automobilindustrie und die zugehörigen Industriezweige in ihre Pflichtenhefte geschrieben. Bereits seit vielen Jahren gehört der Schutz der Umwelt und die Schonung unserer Ressourcen zu den Hauptaufgaben der Automobilindustrie. Die automobilen Erzeugnisse sind das Ergebnis eines umfassenden Konzeptes, welches neben der umweltbewussten Produktion auch die Reduktion der Emissionen und des Treibstoffverbrauchs sowie das Recycling umfasst. Dabei setzen die praktizierten Umweltschutzmassnahmen nicht erst bei der Produktion, sondern bereits bei der Produktentwicklung an.

Im vorliegenden Fact Sheet gilt unsere Aufmerksamkeit dem Thema Fahrzeugemissionen und Treibstoffverbrauch. Wir zeigen den Status Quo, blicken aber auch in die Zukunft. Und die Perspektiven lassen hoffen.

Andreas Burgener
Direktor auto-schweiz

2 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Berichts ist es, auf Grund von Literaturlauswertungen ein möglichst umfassendes, aber trotzdem für jedermann überblickbares und verständliches Bild über den aktuellen Stand und die künftige Entwicklung der Abgas- und CO₂-Emissionen von Personenwagen zu vermitteln.

Als einer der wichtigsten Fakten ist festzuhalten, dass das Problem der Schadstoffemissionen technisch so gut wie gelöst ist. Spätestens mit der um das Jahr 2009 geplanten Einführung von Euro 5 erfolgt auch die Umsetzung in der Serienproduktion. Schon bei den heutigen Euro 4 Fahrzeugen nimmt der Anteil der Partikelfilter stetig zu.

Noch unbefriedigend ist die Situation bei den CO₂-Emissionen und beim Energieverbrauch; hier besteht nach wie vor akuter Handlungsbedarf. Allerdings sind dabei noch lange nicht alle Verbesserungsmöglichkeiten ausgeschöpft. Dazu bedarf es auch in der Motorentechnik weiterer Fortschritte. Diesbezüglich hat insbesondere der Benzinmotor noch Potenzial. Auch Hybridantriebe können hier einen wichtigen Beitrag leisten. Mit Erdgas betriebene Fahrzeuge haben zwar einen geringeren CO₂-Ausstoss als Benzinmotoren, bringen jedoch bezüglich Gesamtenergieverbrauch keine nennenswerten Vorteile.

Neben neuen Motorentechnologien müssen auch alternative Treibstoffe eingesetzt werden. Eine sinnvolle Ergänzung zu herkömmlichen fossilen Treibstoffen sind aus Abfällen und landwirtschaftlicher Überproduktion oder Holz hergestellte Biotreibstoffe. Allerdings sind die Mengen hier begrenzt. Sie reichen bei weitem nicht aus, um den Bedarf zu decken, sind aber eine sinnvolle Ergänzung. Die europäischen Treibstoffnormen (Benzin EN 228, Diesel EN 590) erlauben Beimischungen von Ethanol, respektive Biodiesel bis zu fünf Prozent. Die EU hat sich zum Ziel gesetzt, den Anteil der Biotreibstoffe am Gesamtverbrauch bis 2020 von heute 2 auf 8 % zu erhöhen.

Aus Erdgas oder anderen fossilen Energieträgern (z.B. Kohle) nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellte Treibstoffe bieten weder bei den CO₂-Emissionen noch beim Energieverbrauch Vorteile gegenüber erdölbasierten Treibstoffen. Hingegen können sie dazu beitragen, die begrenzten Vorräte zu strecken. Ausserdem bietet dieses Verfahren Möglichkeiten, bisher abgepackelte Erdgasvorräte in abgelegenen Gebieten ebenfalls zu nutzen. Zudem bietet Synthesediesel bei den Schadstoffemissionen generell Vorteile. Er enthält weder Schwefel, noch Stickstoff noch Aromaten. Daraus resultieren niedrigere Emissionen bei CO, HC, NO_x und Partikeln. Noch besser ist aus Biomasse hergestellter Synthesediesel, der auch bei den CO₂-Emissionen Vorteile bietet.

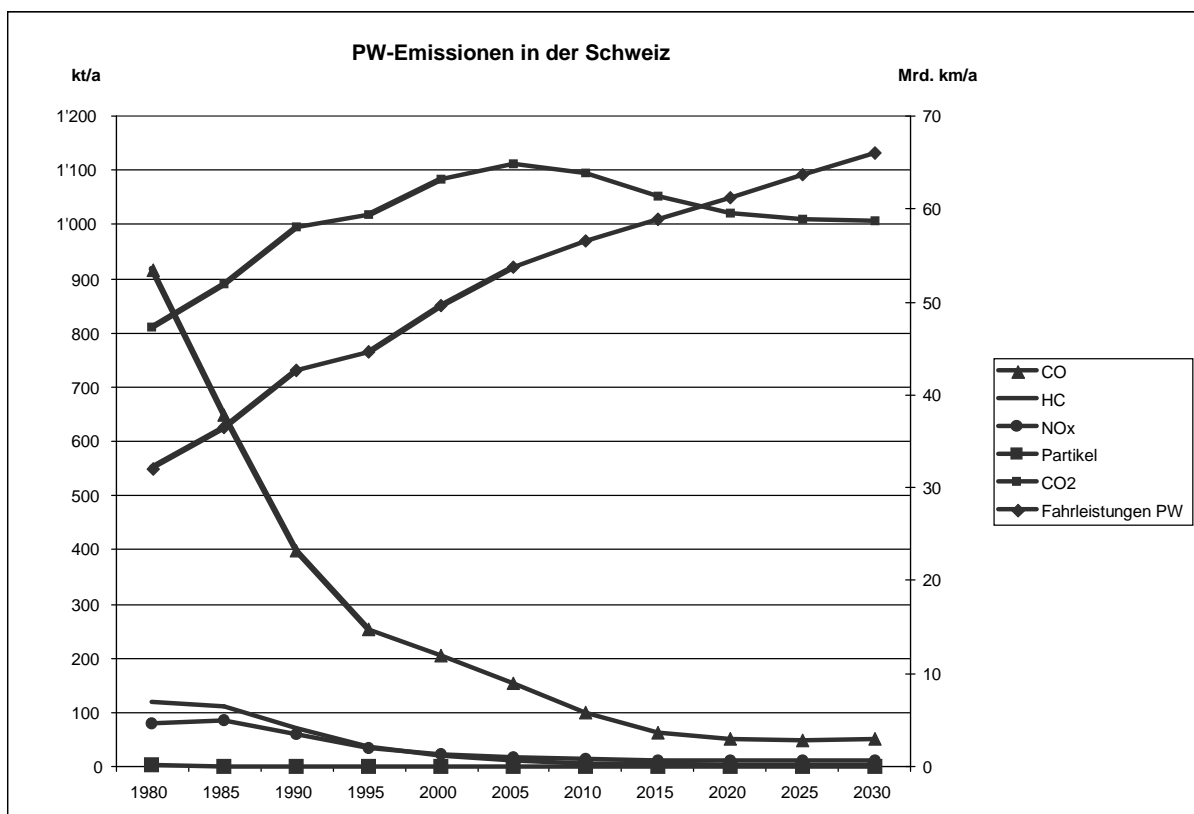
3 Ausgangslage

Die umweltrelevanten Entwicklungsschwerpunkte haben sich in den letzten Jahren geändert. Waren früher die gesamten Schadstoffemissionen das Hauptthema, spricht man heute allenfalls noch von Partikel- und Stickoxidemissionen. Im Brennpunkt der Umweltdiskussion stehen heute jedoch die CO₂-Emissionen und der Energieverbrauch.

In den nächsten Jahren und Jahrzehnten wird der weltweite Energiebedarf weiter ansteigen. Sollte die Energieversorgung im Verkehrssektor weiterhin vom Erdöl abhängig bleiben, führt das zwangsläufig zur Erhöhung der treibhausrelevanten CO₂-Emissionen. Daran werden auch die im Kyoto-Protokoll festgehaltenen Sparmassnahmen kaum etwas ändern, denn die rasante Entwicklung in Schwellenländern wie China und Indien dürfte die Einsparungen in den Industrieländern mehr als nur kompensieren.

Doch welche Alternativen zum Erdöl gibt es und wie steht es um deren Erfolgsaussichten?

Zu den alternativen Treibstoffen, die im Moment zur Diskussion stehen gehören CNG inklusive Biogas, LPG, GTL und BTL, Ethanol, Methanol, ETBE, Biodiesel (RME) und DME (Abkürzungen siehe S. 21). Um erfolgreich zu sein, müssen diese Alternativen jedoch eine ganze Reihe von Anforderungen von Konsumenten (Leistungsfähigkeit, Sicherheit, Preis, Verfügbarkeit), Vertreibern (Verteilung, Infrastruktur) und Motorenherstellern (Kosten, Attraktivität, Leistungsfähigkeit) erfüllen.



Grafik 1: Emissionen und Fahrleistungsentwicklung (Basis Buwal 355)

Wie Grafik 1 zeigt, haben praktisch alle Schadstoffemissionen in den letzten Jahren stark abgenommen. Die seinerzeit vom Bundesrat gesetzten Ziele, die Schadstoffemissionen auf das Niveau der 50er und 60er Jahre zu senken, sind weitgehend erreicht. Mit der derzeitigen Einführung der EURO 4 Norm für Personenwagen und der kommenden EURO 5 Norm sind diesbezüglich noch weitere Reduktionen zu erwarten. Stetig angestiegen sind bisher hingegen die zur Erderwärmung beitragenden CO₂-Emissionen und entsprechend auch der Energieverbrauch.

Allerdings prognostiziert das BUWAL in seinem Bericht Nr. 355 für die Personenwagen auch bei den CO₂-Emissionen – trotz weiterhin steigender Fahrleistungen – eine Stabilisierung und gegen Ende dieses Jahrzehnts sogar eine leichte Abnahme. Trotzdem können die im Kyoto-Protokoll und im CO₂-Gesetz geforderten Ziele durch diese Absenkung nicht erreicht werden.

Die schweren Nutzfahrzeuge wurden in dieser Analyse nicht berücksichtigt. Etliche Aussagen lassen sich aber sinngemäss übertragen. Einschränkungen gibt es hier besonders bei den Treibstoffen, da schwere Nutzfahrzeuge im Gegensatz zu den Personenwagen ausschliesslich mit Dieselmotoren ausgerüstet sind. Demzufolge kommen als alternative Treibstoffe nur solche in Frage, die den Dieseltreibstoff z.B. durch Biodiesel oder GTL ersetzen können. Eine mögliche Alternative ist auch CNG (Compressed Natural Gas bzw. Erdgas). Allerdings sind bei Dieselmotoren wesentlich grössere Änderungen an den Motoren notwendig als bei Benzinmotoren. Das macht beispielsweise Erdgasbusse für den öffentlichen Verkehr wesentlich teurer als vergleichbare Dieselbusse. Hinzu kommt, dass Dieselbusse, die der strengsten Abgasnorm (Euro 5) entsprechen, nach neusten Untersuchungen kaum schlechtere Ergebnisse aufweisen als Erdgasbusse.

4 Emissionen

4.1 Aktuell gültige Grenzwerte für Personenwagen

Im Moment treten die untenstehenden Euro 4 Grenzwerte in Kraft. Die Einführung erfolgt zeitlich gestaffelt, wobei nach neuen Typengenehmigungen und Neuzulassungen sowie nach zwei Gewichtsklassen unterschieden wird.

Motortyp	Schadstoffe	Grenzwerte (g/km)
Benzin	CO	1.0
	HC	0.1
	NO _x	0.08
Diesel	CO	0.5
	HC + NO _x	0.3
	NO _x	0.25
	Partikel	0.025

Tabelle 1: Gültige Emissionsgrenzwerte für Personenwagen (< 2500 kg Gesamtgewicht)

4.2 Welche Grenzwerte bringt die EURO 5-Norm?

Die Einführung der EURO 5-Norm für Personenwagen ist etwa für das Jahr 2009 geplant. Die Grenzwerte sind noch nicht definitiv festgelegt, aber es ist u. a. vorgesehen, die Partikelgrenzwerte gegenüber EURO 4 noch einmal drastisch zu senken. Die EU-Kommission schlägt einen Partikelgrenzwert von 0.005 g/km vor, was nach heutigem Wissensstand den Einsatz eines Partikelfilters erforderlich macht. Eine Neuerung: Der Partikelgrenzwert soll auch für Benzinmotoren (Direkteinspritzer mit Magerbetrieb) gelten. Ebenfalls diskutiert wird die Begrenzung der Anzahl der Partikel, als Ergänzung zur bisherigen gravimetrischen Messung. Ausserdem sollen bei EURO 5 die Stickoxidgrenzwerte auf 0.06 g/km bei Benzin- und 0.2 g/km bei Dieselmotoren gesenkt werden. Wegfallen wird die Einteilung der PW in zwei Gewichtsklassen.

4.3 Kurzbeschreibung der amerikanischen Abgasvorschriften.

Die weltweit tiefsten Abgasgrenzwerte schreibt die kalifornische «Super Low Emission Vehicle» (SULEV) Vorschrift vor. Ausgehend von einem bereits sehr sauberen Euro 4 Dieselmotor müssen zur Erfüllung dieser Grenzwerte die Kohlenmonoxid-Konzentrationen (CO) um weitere 50 Prozent, Partikel (PM) um 80 bis 90 Prozent und Kohlenwasserstoffe (HC) sowie Stickoxide (NO_x) um mehr als 90 Prozent reduziert werden.

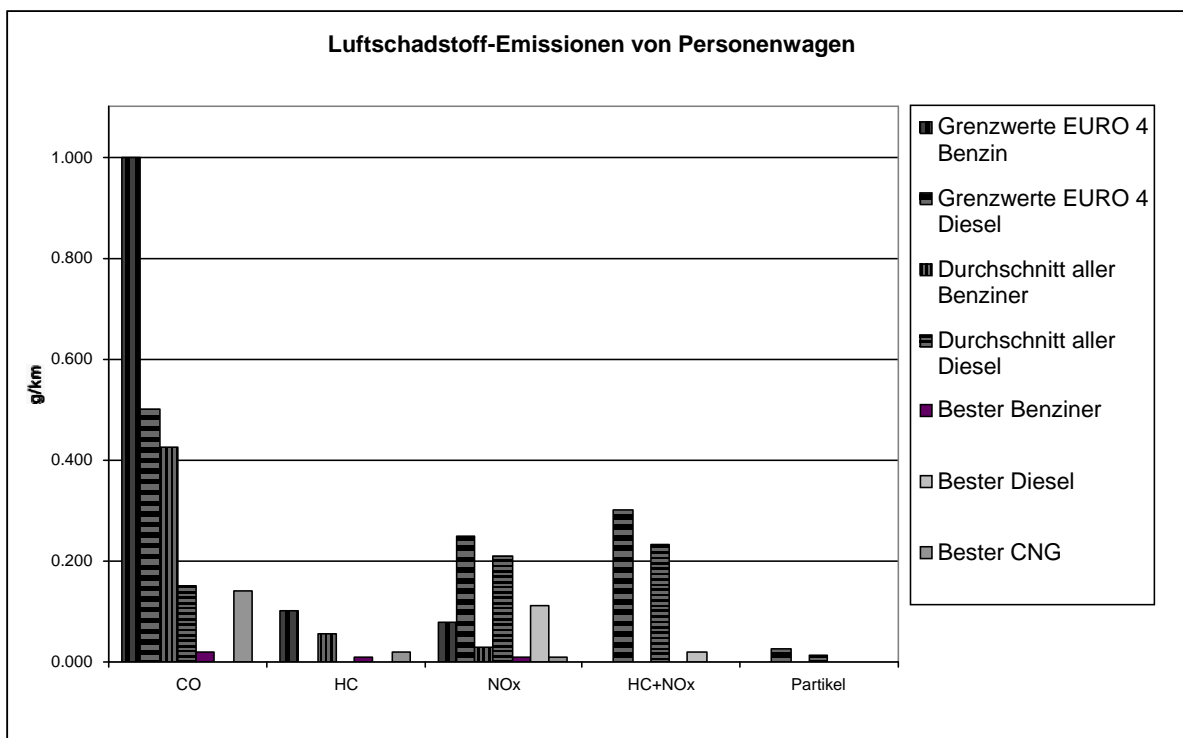
4.4 Auswertung der Emissionen nach Schweizer Typengenehmigungen

Interessant sind aber nicht nur die Grenzwerte, sondern auch der Stand der effektiven Emissionen. Für die nachfolgende Auswertung wurden aus der Emissionsliste des Bundesamtes für Strassen (Stand 8.2005) alle bereits nach Euro 4 typengenehmigten Personenwagen ausgewertet.

Anmerkung:

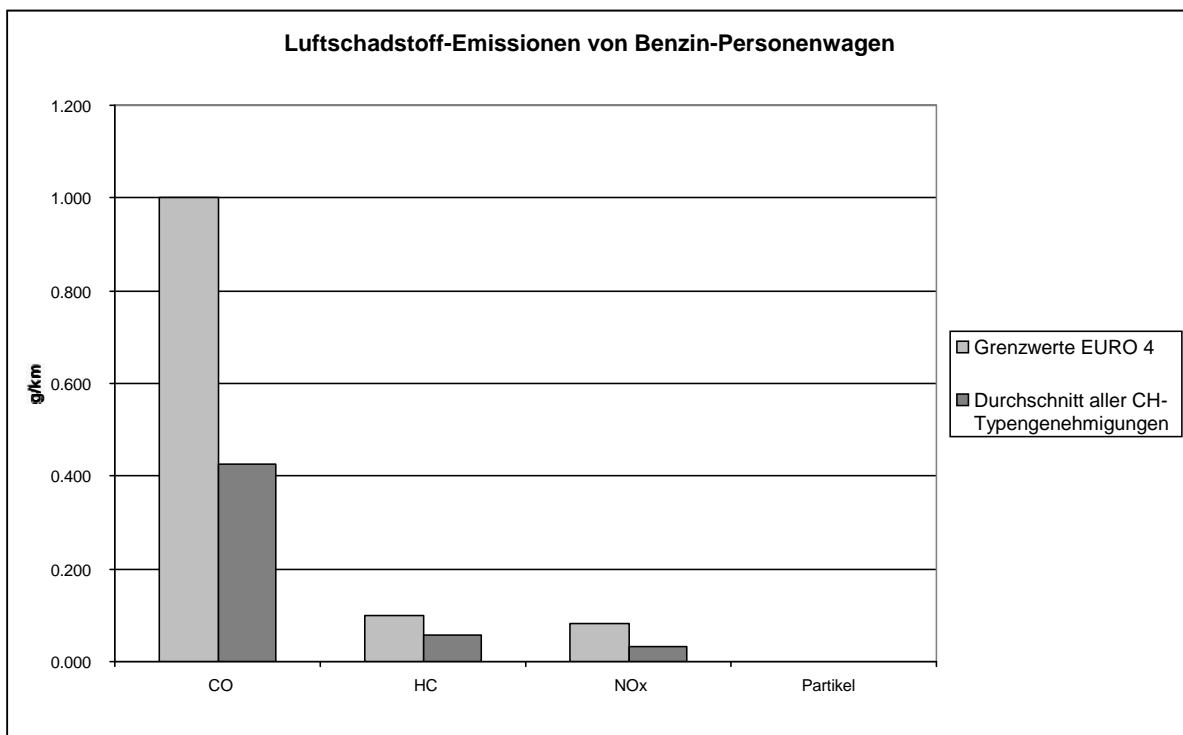
Zum Zeitpunkt der Auswertung vom Oktober 2005 waren von den 837 in der Schweiz nach der EURO 4 Norm ausgestellten Typengenehmigungen von Dieselpersonenwagen bereits 363 mit Partikelfilter ausgerüstet. Das entspricht einem Anteil von 43.4 %.

Wie die nachstehenden Grafiken zeigen, gibt es je nach Motoren und Treibstoffen deutliche Unterschiede in den Emissionen.

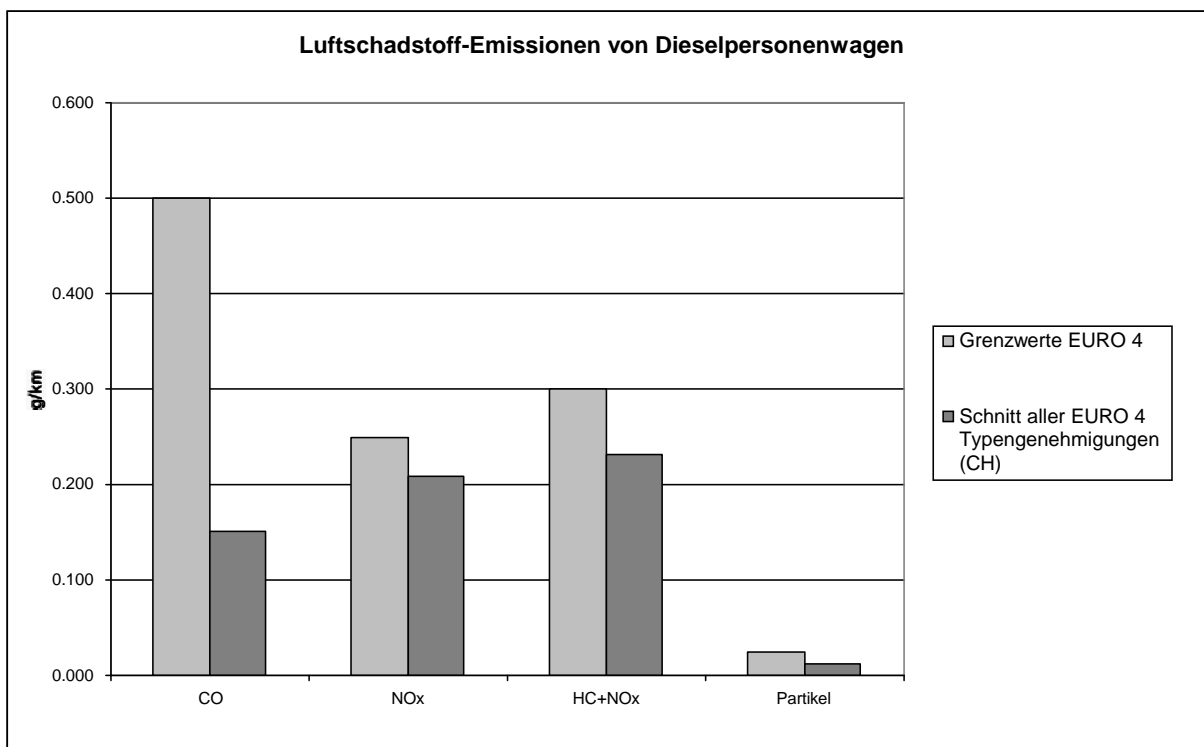


Grafik 2: Luftschadstoffemissionen von Personenwagen

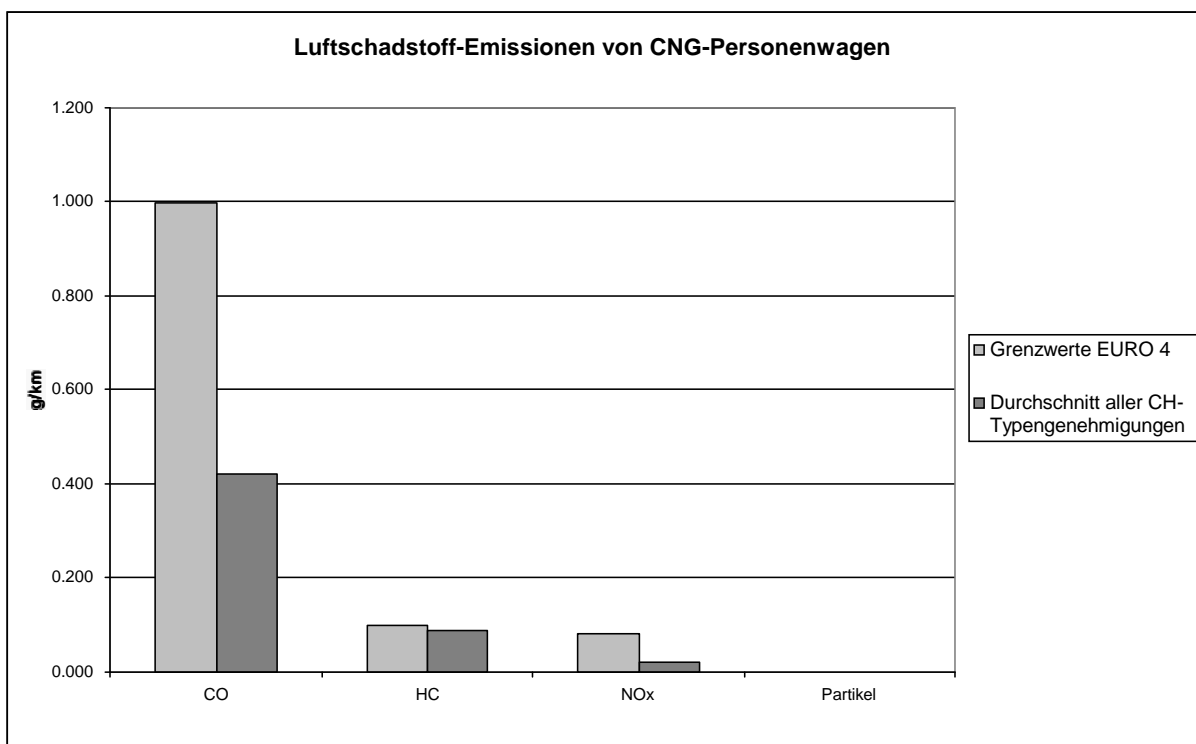
Beim Kohlenmonoxid (CO) liegen die Emissionen der Dieselfahrzeuge klar tiefer als diejenigen der Benziner. Der Durchschnittswert aller Typengenehmigungen liegt um rund 60 Prozent unter demjenigen der Benziner. Auf der anderen Seite ist der Diesel bei den Stickoxiden deutlich schlechter. Der Durchschnittswert aller Benziner ist um rund 85 Prozent niedriger als der Durchschnitt aller Dieselfahrzeuge.



Grafik 3: Luftschadstoff-Emissionen von Benzin-Personenwagen



Grafik 4: Luftschadstoff-Emissionen von Dieselpersonenwagen



Grafik 5: Luftschadstoff-Emissionen von CNG-Personenwagen

Es fällt auf, dass die CNG-Fahrzeuge im Gasbetrieb im Schnitt bei den HC-Emissionen um knapp 40 Prozent über dem Schnitt der Benziner liegen. Allerdings bestehen diese HC zum grössten Teil aus unverbranntem Methan. Methan gilt zwar nicht direkt als Luftschadstoff, gehört aber zu den Treibhausgasen.

4.5 Emissionen beim Abbrennen des Russes in einem Partikelfilter

Im Zusammenhang mit Partikelfiltern stellt sich auch die Frage, welchen Einfluss das Abbrennen des Russes im Partikelfilter auf die Emissionen hat.

Der deutsche Automobilclub ADAC hat diese Frage bei einem Langstreckentest über 80'000 km mit einem Peugeot 607 HDI FAP untersucht. Dabei wurden die Abgasemissionen auf dem Prüfstand sowohl mit als auch ohne Filterregeneration gemessen. Während der Regenerationsphase treten kurzzeitig deutlich höhere gasförmige Emissionen auf und auch der Treibstoffverbrauch ist höher. Da die Regeneration aber nur in Abständen von vielen hundert Kilometern erfolgt, ist mit einem Einfluss der Regenerationsphase auf die Gesamtemissionen von bis zu 2,5% zu rechnen, wobei beim vom ADAC gemessenen Fahrzeug die durchschnittliche Erhöhung der Gesamtemission nur 0,6% betrug. Insgesamt spielten die Emissionen während der Regeneration somit nur eine geringe Rolle.

5 Treibstoffe

Auch im Jahr 2005 ist Benzin der mit Abstand wichtigste Treibstoff für Personenwagen. Gemäss Bundesamt für Statistik waren per 30.9.2004 bei den Personenwagen nur 8.4 % des Bestandes mit einem Dieselmotor ausgerüstet. Der Anteil der benzinbetriebenen Fahrzeuge belief sich auf 91,6 % – davon übrigens 94,5 % mit Katalysator. Andere Antriebsarten wie Gas- und Elektrofahrzeuge machten weniger als 0.04 % des Bestandes aus.

Allerdings holt der Diesel kräftig auf. Im Jahr 2004 waren schon knapp 26 % aller während des Jahres abgesetzten Neufahrzeuge mit einem Dieselmotor ausgestattet.

Gemäss der Richtlinie 2003/17/EG zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG müssen in der EU seit dem 1.1.2005 Benzin- und Dieseltreibstoffe mit weniger als 10 ppm Schwefel zur Verfügung stehen. Ab 01.01.2009 darf in den EU-Ländern nur noch diese Qualität angeboten werden. In der Schweiz dürften wegen der seit dem 01.01.2004 auf schwefelhaltigen Treibstoffen erhobenen Lenkungsabgabe schon bald nur noch schwefelfreie Qualitäten zur Verfügung stehen.

5.1 Mögliche Alternativen und/oder Ergänzungen zu Benzin und Diesel

- Erdgas (CNG)
- Biogas
- Flüssiggas (LPG)
- GTL (Synfuel, synthetische Treibstoffe aus Erdgas)
- Methanol
- Ethanol
- BTL (Sunfuel, synthetische Treibstoffe aus Biogas, respektive Biomasse)
- FAME (Fettsäuremethylester), wie zum Beispiel RME (Rapsdiesel)
- ETBE (Ethyltertiärbutylether)
- DME (Dimethylether)

5.2 Kurzdefinitionen der verschiedenen Treibstoffe

5.2.1 Benzin

Benzin ist ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen, das Zusätze von sauerstoffhaltigen, organischen Komponenten sowie Additive zur Verbesserung seiner Eigenschaften enthalten kann.

Die europäische Norm EN 228 beschreibt das in ganz Europa eingeführte unverbleite Benzin ("Euro-Super"). In der Schweiz wird vor allem die Qualität "Bleifrei 95" angeboten. Seit dem Verbot des verbleiten Superbenzins wird vermehrt auch eine bleifreie Alternative mit gleicher Oktanzahl (Bleifrei 98, Super Plus) vermarktet. Sogenanntes Normalbenzin mit 91 Oktan ist in der Schweiz - im Gegensatz zu Deutschland beispielsweise - seit der Einführung des bleifreien Benzins nicht mehr auf dem Markt.

5.2.2 Diesel

Auch Dieseltreibstoff besteht aus einer Vielzahl verschiedener Kohlenwasserstoffe. In Europa gilt für Diesel die Norm EN 590.

5.2.3 Erdgas (CNG)

CNG steht für Compressed Natural Gas. Hierbei handelt es sich überwiegend um komprimiertes Methan (CH_4). Erdgas bildet bei der Verbrennung wegen des grösseren H/C-Verhältnisses verglichen mit anderen Treibstoffen weniger CO_2 . Auf der anderen Seite sind die HC-Emissionen verglichen mit Benzinmotoren deutlich höher. Allerdings bestehen diese im Gasbetrieb überwiegend aus Methan. Dessen Treibhausgaswirkung ist übrigens mehr als zwanzigmal höher als die von CO_2 . Nicht ganz unproblematisch ist beim Erdgas, dass es für die Anwendung als Treibstoff bisher keine Qualitätsnorm gibt.

5.2.4 Biogas

Aufbereitetes Biogas entspricht in seiner Zusammensetzung und seinen Eigenschaften dem CNG. Allerdings ist es nicht fossilen Ursprungs, sondern wird durch Vergärung von Biomasse (z.B. Garten- und Küchenabfälle, landwirtschaftliche Überproduktion, Holz) gewonnen.

5.2.5 Flüssiggas (Autogas)

Dieses auch als LPG (Liquified Petroleum Gas) bezeichnete Gemisch aus den Hauptkomponenten Propan und Butan (C_3H_8 und C_4H_{10}) fällt bei Raffinerieprozessen an und lässt sich unter Druck verflüssigen. Es wird auch als Treibstoff eingesetzt, hat aber in der Schweiz momentan kaum Bedeutung, da es bei uns praktisch keine LPG-Personenwagen gibt. Im Gegensatz zu Erdgas ist Flüssiggas schwerer als Luft. Das kann bezüglich Sicherheit bei Undichtigkeiten (z.B. in Parkhäusern oder bei Unfällen) Probleme bereiten.

5.2.6 Alkohole (Methanol und Ethanol)

Methanol lässt sich aus den reichlich vorhandenen kohlenstoffhaltigen Rohstoffen wie Kohle, Erdgas, Schweröl aber auch aus Holz herstellen. Methanolzusätze von ≤ 3 Vol% sind in vielen Ländern zugelassen.

Ethanol kann durch Vergären von Biomasse gewonnen werden. Nebst Abfällen aus Garten, Küche und Landwirtschaft eignet sich auch Biomasse aus landwirtschaftlicher Überproduktion oder speziell auf sonst brach liegenden Flächen angebauten Pflanzen. Die EN228 erlaubt Zusätze von bis zu 5 Vol% Ethanol.

Die alcosuisse, ein Profitcenter der Eidgenössischen Alkoholverwaltung, prüft gegenwärtig die Beimischung von Bioethanol zu Benzin und Diesel.

5.2.7 GTL (Synfuel)

Als GTL (Gas to liquid) werden mit der Fischer-Tropsch-Synthese aus Erdgas hergestellte flüssige Treibstoffe (Benzin oder Diesel) bezeichnet. Sie entsprechen grundsätzlich herkömmlichen Treibstoffen, können aber in ihrer Zusammensetzung viel genauer eingestellt werden, als bei der Raffinierung aus Rohöl. Das führt zu besseren Emissionswerten von bestehenden Motoren. Bei einer flächendeckenden Versorgung mit diesen Treibstoffen könnten die neuen Motoren dafür optimiert werden, was weitere Verbesserungen sowohl bei den Emissionen als auch beim Verbrauch zur Folge hätte.

Werden solche Treibstoffe aus Biomasse hergestellt, nennt man sie BTL (Biomass to liquid) oder Sunfuel.

Mit der Fischer-Tropsch-Synthese ist es grundsätzlich auch möglich, aus anderen kohlenstoffhaltigen Rohstoffen, wie zum Beispiel Kohle, synthetische Treibstoffe herzustellen.

5.2.8 FAME (Fettsäuremethylester)

Unter Fettsäuremethylester versteht man alle mit Methanol umgeesterten pflanzlichen und tierischen Öle und Fette. Der bekannteste ist der Rapsmethylester (RME). Für diesen Treibstoff gibt es seit 2004 auch eine europäische Norm (EN 14214). Bei den CO₂-Emissionen bringt der RME klare Vorteile. Allerdings hat er auch Nachteile. So geben die meisten Hersteller für ihre modernen Motoren wegen der hohen Einspritzdrücke und der elektronischen Regelung keine Freigabe für den Betrieb mit reinem RME. Zudem ist RME chemisch weniger stabil als Diesel, was die Langzeit-Lagerhaltung erschwert. Unproblematisch ist hingegen die Beimischung zu Diesel in der gemäss EN 590 erlaubten Grössenordnung von maximal 5 Vol%. RME wird auch in der Schweiz produziert und sowohl in reiner Form als auch als Beimischung zu Diesel eingesetzt.

5.2.9 ETBE (Ethyltertiäbutylether)

ETBE wird aus Ethanol hergestellt und kann an Stelle des heute eingesetzten Methyltertiäbutylether (MTBE) zur Erhöhung der Klopfestigkeit und der Oktanzahl zum Benzin beigemischt werden. Gemäss Norm EN 228 können dem Benzin bis maximal 15 Volumenprozent beigemischt werden.

5.2.10 DME (Dimethylether)

DME ist ein synthetisches Produkt mit einer hohen Cetanzahl, das in einem Dieselmotor russarm und mit reduzierter Stickoxidbildung verbrannt werden kann. Er hat aber wegen seiner geringen Dichte und des hohen Sauerstoffanteils einen geringen Heizwert. Zudem ist er gasförmig, was erhebliche Anpassungen an den Fahrzeugen erfordert.

5.3 «Well-to-Wheel» Analyse

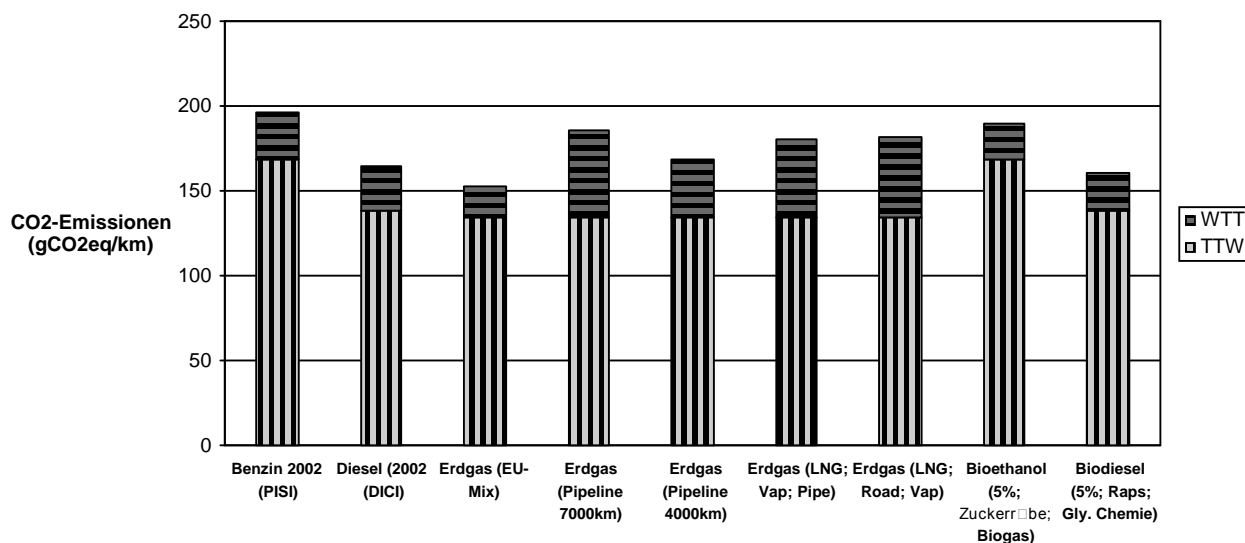
Unter einer «Well-to-Wheel» Analyse ist die genaue Untersuchung des gesamten Prozesses der Herstellung und Verwendung von Treibstoffen bis zur Kraftübertragung auf die Räder eines Fahrzeugs zu verstehen. Sie resultiert aus einer Abschätzung des erforderlichen Energieverbrauchs und der damit verbundenen Treibhausgas-Emissionen. Die Analyse besteht aus zwei Teilen:

- «Well-to-Tank» (Treibstoff): Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen über den gesamten Treibstoffpfad, vom Ausgangsstoff bis zum Fahrzeugtank.
- «Tank-to-Wheel» (Fahrzeug): Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen beim Betrieb des Fahrzeuges in einem definierten Fahrzyklus.

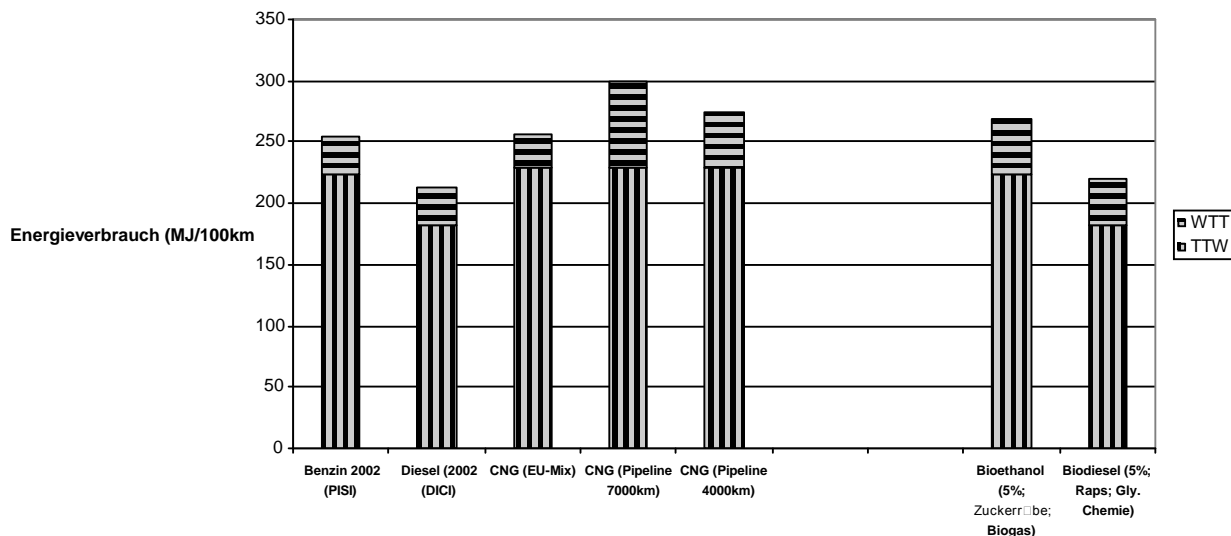
Nachstehend die wichtigsten Erkenntnisse aus der «Well-to-Wheel»-Analyse von General Motors für fortschrittliche Treibstoff- und Fahrzeugsysteme:

- Hybridisierung verringert den Treibstoffverbrauch bei allen Antriebssystemen.
- Die geografische Lage der Erdgasvorkommen hat grosse Auswirkungen auf die Treibhausgas-Emissionen (Emissionen beim Transport).
- Optimierte CNG-Fahrzeuge führen, verglichen mit Fahrzeugen mit einem Benzin-Verbrennungsmotor, zu geringeren Treibhausgas-Emissionen. Sie bieten jedoch keinen Nutzen hinsichtlich des „Well-to-Wheel“ Energieverbrauchs.
- Biokraftstoffe tragen zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen bei. Das Ausmass der Verbesserung hängt jedoch von den N₂O-Emissionen beim Anbau der Biomasse ab.
- Diesel-Fahrzeuge, die mit Treibstoff aus dem Fischer-Tropsch-Prozess betrieben werden, bewirken einen höheren Energieverbrauch und höhere Treibhausgas-Emissionen als beim Betrieb mit erdölbasiertem Diesel.
- Verbrennungsmotoren, die mit flüssigem Wasserstoff aus Erdgas betrieben werden, erzeugen keine CO₂-Emissionen im Fahrzeug, jedoch höhere „Well-to-Wheel“ Treibhausgas-Emissionen als herkömmliche Benzin- oder Diesel-Fahrzeuge.

Wie die untenstehenden Grafiken zu den CO₂-Emissionen und zum Energieverbrauch zeigen, kommt auch die europäische CONCAWE-Studie zu ähnlichen Resultaten.



Grafik 6: CO₂-Emissionen "well to wheel"



Grafik 7: Energieverbrauch "well to wheel"

Fazit: Einen „idealen“ alternativen Treibstoff, der in jeder Beziehung besser ist als Benzin und Diesel aus fossilen Quellen, gibt es derzeit nicht.

Trotzdem müssen alternative Treibstoffe gefördert werden, können sie doch mithelfen, die begrenzten Vorräte der fossilen Treibstoffe zu strecken und teilweise auch die Treibhausgasemissionen zu verringern.

Sinnvoll erscheint insbesondere der Einsatz von Biotreibstoffen, vorallem wenn sie aus Abfällen oder Überschüssen der Landwirtschaft produziert werden können.

Trotz höherem Gesamtenergieverbrauch kann auch die Verflüssigung von Erdgas Sinn machen, insbesondere wenn es aus bisher ungenutzten Quellen stammt.

6 Motorentechnik

Aktuell sind heute Benzin- und Dieselmotoren nach der Norm Euro 4, die für die Zulassung ab 01.01.2006 obligatorisch ist. Für die Typengenehmigung gilt bereits seit 01.01.2005 ausschliesslich Euro 4.

Bei den Benzinmotoren entsprechen bereits heute die Mehrheit der angebotenen Modelle der Euro 4 Norm. Die Dieselmotoren sind diesbezüglich noch etwas in Verzug, doch bietet der Markt auch hier schon eine gute Auswahl (Stand Oktober 2005 = 837 Typengenehmigungen von Dieselmotoren nach Euro 4).

Alle massgebenden Experten sind sich einig, dass mindestens mittelfristig der Hubkolbenmotor immer noch die Hauptantriebsquelle bleiben wird.

6.1 Benzinmotoren

Hier sehen die Experten im Moment noch ein grösseres Entwicklungspotential als beim Dieselmotor. Bereits angelaufen ist die Einführung der Benzindirekteinspritzung. Viel Potenzial sehen die Fachleute auch bei der Ventilsteuerung. Erste Schritte mit variablen Steuerzeiten sind bereits gemacht. Weitere Verbesserungen werden voll variable Ventilsteuerungen bringen, bei denen die elektrisch oder pneumatisch betätigten Ventile elektronisch gesteuert werden. Ebenfalls in Entwicklung sind Kombinationen von Direkteinspritzung mit Hochaufladung und variabler Verdichtung. Nach Aussagen von Fachleuten soll es kurzfristig möglich sein, Turbomotoren mit Direkteinspritzung zu bauen, die beim Verbrauch bis auf 4 Prozent an den Diesel herankommen.

6.2 Dieselmotoren

Beim Dieselmotor wurden in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt. Aber auch hier werden noch Verbesserungen möglich sein. Potenzial gibt es vor allem noch auf der Abgasseite. Ein Stichwort ist hier sicher der Partikelfilter, der spätestens für Euro 5 bei allen Motoren erforderlich sein dürfte, sich vermutlich aber auf Grund der Kundennachfrage schon vorher durchsetzen wird.

Auch bezüglich der Stickoxid-Emissionen weist der Diesel gegenüber dem Benzinmotor Nachteile auf. Wegen der wirtschaftlichen Bedeutung der Dieselfahrzeuge in Europa lagen die Grenzwerte für die NO_x-Emissionen immer deutlich über denjenigen der Benziner.

Ein anderer Lösungsansatz zur Reduktion von Partikel- und Stickoxidemissionen sind die sogenannten SCR-Systeme (Selective Catalytic Reduction), die bisher vor allem in schweren Nutzfahrzeugen zum Einsatz kommen, seit kurzem aber auch in Personenwagen als Alternative geprüft werden. Im Gegensatz zu Motoren mit Partikelfiltern, deren Verbrennung auf minimale Stickoxidwerte eingestellt wird, sind die SCR-Motoren auf minimale Partikelwerte ausgelegt. Die hohen Stickoxidanteile werden dann unter zusätzlicher Einspritzung von Harnstoff im SCR-System katalytisch reduziert. Der Hauptvorteil dieses Systems gegenüber einem Partikelfilter sind die niedrigeren Treibstoffverbrauchswerte. Der Nachteil ist, dass die Partikelemissionen mit diesem System zwar unter den Grenzwert abgesenkt werden können, aber nicht das tiefe Niveau eines mit Partikelfilter ausgerüsteten Motors erreichen.

6.3 Erdgasmotoren

Alle heute angebotenen Erdgas-Modelle sind bivalent, das heisst, sie können sowohl mit Erdgas als auch mit Benzin betrieben werden. In Anbetracht des immer noch ziemlich grobmaschigen Tankstellennetzes ist das verständlich. Allerdings wird damit das Potential des Erdgases als Treibstoff nicht optimal genutzt. Erdgas ist wesentlich klopfester als Benzin. Bei reinen Erdgasmotoren kann also die Verdichtung erhöht werden, was den Wirkungsgrad verbessert. Eine andere Möglichkeit, die sich daraus ergibt, ist die Verbindung von Hubraumverkleinerung und Aufladung, das sogenannte Downsizing.

6.4 Hybridantriebe

Heute erhältliche Hybridsysteme basieren alle auf einer Kombination von Benzin- und Elektromotoren. Diese Antriebe erreichen bei den CO₂-Emissionen die Werte von Dieselfahrzeugen und bieten gleichzeitig bei den Partikel- und insbesondere bei den NO_x-Emissionen deutliche Vorteile. Nachteile finden sich vor allem auf der Kostenseite. Aber strengere Emissionsvorschriften werden wegen der aufwändigeren Abgasreinigung in Zukunft insbesondere den Dieselmotor ebenfalls deutlich verteuern.

7 Das Wichtigste auf einen Blick

Versucht man, die in diesem Bericht behandelten Punkte unter einen Hut zu bringen, stellt man folgendes fest:

7.1 Schadstoffemissionen

Bei den Schadstoffen der Benzinmotoren gibt es dank Verbesserungen bei der Motorentechnik, aber auch bei den Treibstoffen (z.B. Reduktion des Schwefelgehalts) kaum noch Probleme. Dagegen besteht in Bezug auf die Partikel- und Stickoxid-Emissionen bei den Dieselmotoren noch ein gewisser Handlungsbedarf. Allerdings wird bereits ein erheblicher Anteil der EURO 4-Fahrzeuge mit Partikelfilter ausgerüstet. Mit der Einführung von EURO 5 wird es weitere Fortschritte geben. Heute besteht so ziemlich Gewissheit, dass bei den Partikeln insbesondere die kleinen, im Nanometerbereich liegenden gesundheitlich bedenklich sind. Um diese Nanopartikel möglichst wirkungsvoll zu eliminieren, braucht es ein neues Messverfahren mit entsprechenden gesetzlichen Grenzwerten, die nicht bzw. nicht nur die Partikelmasse, sondern auch die Partikelanzahl begrenzen.

7.2 Treibhausgase und Energieverbrauch

In diesem Bereich genügt es nicht, nur die Effizienz des Fahrzeugs zu betrachten. Vielmehr spielt auch die Bilanz der Treibstoffherstellung eine wichtige, oft entscheidende Rolle. Eine ganzheitliche Betrachtungsweise ist hier besonders wichtig.

Bei der Effizienz der Fahrzeuge wird es auch in den nächsten Jahren Fortschritte geben. Vor allem der Benzinmotor hat noch Entwicklungspotential. Einen nicht unwesentlichen Beitrag können auch Hybridfahrzeuge leisten.

7.3 Treibstoffe

Für den Einsatz in Fahrzeugen eignen sich flüssige Treibstoffe nach wie vor am besten, insbesondere auch deshalb, weil damit die bestehende Versorgungsinfrastruktur praktisch unverändert übernommen werden kann.

Biotreibstoffe können einen wichtigen und rasch umsetzbaren Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen im Verkehrsbereich leisten. Allerdings wird dieser oft überschätzt. Mindestens mittelfristig dürfte ihr Anteil am Gesamtverbrauch im einstelligen Prozentbereich bleiben. Idealerweise sollten Biotreibstoffe in flüssiger Form erhältlich sein und den fossilen Treibstoffen beigemischt werden. Aus dem Blickwinkel der Versorgungssicherheit sind auch GTL-Treibstoffe interessant. Energetisch und in der CO₂-Bilanz bieten sie aber keine Vorteile gegenüber erdölbasierten Treibstoffen.

8 Abkürzungen

CO	Kohlenmonoxid
HC	Kohlenwasserstoff
NO _x	Stickoxid
N ₂ O	Distickstoffoxid
CO ₂	Kohlendioxid
SULEV	Super Low Emission Vehicle
CNG	Compress Natural Gas = Erdgas
LPG	Liquified Petroleum Gas
GTL	Gas to liquid
BTL	Biomass to liquid
MTBE	Methyltertiärbutylether
FAME	Fettsäuremethylester
EN	Europanorm
RME	Rapsmethylester
ETBE	Ethyltertiärbutylester
DME	Dimethylether
FAP	Filtre à particules = Partikelfilter

9 Literaturverzeichnis

- Bosch Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 23. Auflage
- CONCAWE, Well-to-Wheels Report, Version 1b, Januar 2004
- GM Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions
- BUWAL-Bericht Nr. 355
- CO₂-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandesaufnahme, IFEU Heidelberg